基于MSPA模型和电路理论的晋西北国土空间生态修复关键区域识别

李可璇[1]， 张 蕾[2]， 李 豪[2]， 张恩月[1]， 李育桢[1]，
宋彩云[1]， 刘 庚[1]

（1. 太原师范学院地理科学学院，山西 晋中 030619； 2. 太原师范学院经济与管理学院，山西 晋中 030619）

摘 要： 国土空间生态修复是落实国家生态文明战略的重要举措，生态修复关键区域识别是国土空间生态修复的关键一环，是科学开展生态修复的关键和难点，对维护区域生态安全具有重要的意义，但当前我国国土空间生态修复关键区域识别相关理论研究滞后于实践工作。本文以晋西北为研究区，通过形态学空间分析（Morphological Spatial Analysis，MSPA）模型结合生态系统服务价值识别生态源地，采用电路理论识别与提取生态廊道，在此基础上，进行生态修复关键区域识别及时空演变规律分析，从而给出对应生态修复策略。结果显示：2000—2020年晋西北生态源地数量及面积均呈现增加的趋势，20 a间生态源地总面积从1898.43 km^2增长到2026.17 km^2，空间分布呈现南部集中连片，北部零散分布的特点；生态廊道数量与长度先增加后减少，空间分布上南部保持短且密集，中部和北部由长且稀疏趋向短且密集。生态修复关键区域中，生态夹点面积总体下降，20 a间从262.89 km^2下降至194.34 km^2，夹点普遍分布于生态廊道的两端邻近生态源地的区域，主要分布在偏关县、平鲁区、神池县和朔城区；生态障碍点整体呈现增加趋势，20 a间从324.61 km^2增长到504.72 km^2，随后又减少到338.86 km^2，障碍点普遍分布于生态廊道的中段，由聚集分布转变为均匀分布。研究综合生态修复关键区域时空演变特征及研究区生态本底，提出针对性生态修复策略，即加强夹点和障碍点的小流域、小区域治理，减少人为干扰，以期为区域国土空间生态修复工作提供参考。

关键词： 国土空间生态修复；关键区域识别；时空演变；晋西北

近年来，随着经济社会的发展以及人类活动扰动增强，生态环境承受着巨大的压力[1]，自然资源减少、生态系统退化、生物多样性减少、水土流失、土地退化等生态问题频发[2]，国土空间生态安全受到了严重威胁。如何构建和优化国土空间生态保护修复格局，实现国土空间优化和生态功能提升，是当前国土空间生态修复需要关注的重要问题。生态修复关键区域的识别是构建国土空间生态安全格局的基础，是科学合理布局生态修复空间格局的关键和难点，整体性、系统性、层次性地提取生态修复关键区域对国土空间生态修复工作的科学开展，国土空间优化及生态功能的提升均具有重要的意义。

随着生态文明建设进程的加快，中国国土空间生态保护和修复规划工作，已由国家层面宏观指导、省级层面统筹设计推进到县级层面落实操作[3]，目前，全国范围内已有许多省、市、县开展了国土空间生态修复规划工作，但在相关理论研究方面还存在滞后于实践的情况，开展相关生态修复理论研究既是对实践工作的指导和支撑，又是对生态修复相关理论研究的填充。

目前，关于国土空间生态修复关键区域识别的研究主要集中在相关概念的探讨、生态安全格局的构建方法、生态系统演变分析、生态修复分区等方面，并已形成了“生态源地识别-阻力面构建-生态廊道提取-关键区域识别”的研究范式[4]。在已有研究中，生态源地的识别除直接将林地等生境质量

收稿日期： 2024-04-08； **修订日期：** 2024-06-19
基金项目： 国家自然科学基金项目（41701108）；山西省哲学社会科学规划课题（2023YY220）
作者简介： 李可璇（1998-），女，硕士研究生，主要从事国土空间生态修复研究. E-mail: 1195797486@qq.com
通讯作者： 刘庚. E-mail: liugeng9696@126.com

较好的地区视为源地外[5]，还采用生态系统服务功能评估模型（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs，InVEST）[6-7]、生境适宜性评价[8]、形态学空间分析（Morphological Spatial Analysis，MSPA）[9-10]等方法。如覃彬桂等[11]采用InVEST模型和景观连通性评价提取生态源地，结合电路理论构建生态安全格局，李倩瑜等[12]通过MSPA、生态系统服务重要性评价和最小累积阻力模型（Minimum Cumulative Resistance，MCR）在识别生态源地的基础上构建生态网络，进行生态修复分区。其中，MSPA基于数学形态学原理对二值化的栅格图像进行分类[13]，被广泛应用于景观类型识别，其筛选得到的核心区为大型自然斑块、野生动物栖息地等；而生态系统服务价值划分出人类直接或间接从生态系统得到利益最大的区域，两者结合识别出的生态源地对人地关系协调具有重要影响。生态廊道构建方法以MCR模型和电路理论为主，相比于MCR模型，电路理论[14-17]通过电子在电路中随机游走的特性来模拟物种在景观中的迁移扩散过程[18]，能够更真实地反映生物迁徙路径。

当前，生态修复关键区域识别研究普遍聚焦区域现状，且研究以区域[19-21]、市域[22-24]、县域[25-27]、流域[28-29]为主，也有针对以国家公园[30]、城市群[31-32]为代表的特定区域的研究，但关于黄土高原的关键区域识别研究少有报道，尤其缺乏黄土高原农牧交错带生态背景下生态脆弱区的生态修复关键区域识别研究。

晋西北地区是典型的黄土高原丘陵区，是中国北方农牧交错带的重要组成部分，也是京津冀生态屏障的关键一环[33]，同时还是“三北”防护林工程、国家京津风沙源治理工程、退耕还林工程等多项国家生态工程及省级生态工程的关键区域。该区域生态本底薄弱，部分地区存在植被退化与土地沙化的风险[34]，生态稳定性差，区域内集合了宁武、河东、大同三大煤田，是中国煤炭主产区之一，工业生产与其他人类活动的扰动使得脆弱的生态环境承受巨大压力，严重威胁区域生态安全。鉴于此，本文以晋西北为研究区，将MSPA与生态系统服务价值评价相结合识别生态源地，利用电路理论进行生态廊道、夹点和障碍点提取，并分析2000—2020年晋西北地区关键区域的时空演变规律，从而实现对晋西北地区生态安全格局的动态监测，厘清生态安全格局形势，制定针对性的保护与修复策略，在紧扣国家生态文明战略的基础上，补充落后于生态修复实践的理论，实现对生态脆弱区的科学指导。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

晋西北地区是京津冀生态屏障，行政范围包括左云、右玉、平鲁区、朔城区、河曲、偏关、保德、神池、五寨、山阴、岢岚、兴县12个县，土地面积为21034.73 km²（图1），该区西临黄河，东接大同，北接

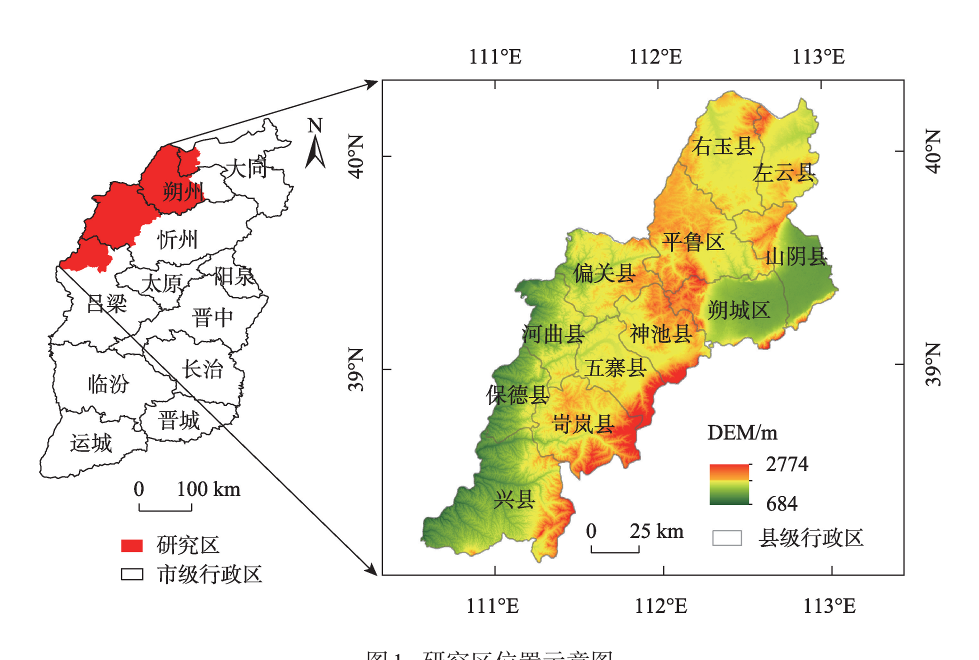


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

内蒙古，南部延伸至芦芽山，海拔介于684~2774 m，地形以典型的黄土丘陵为主，是黄土高原的重要组成部分。晋西北地处东部季风的边缘区，属温带大陆性季风气候，干旱与半干旱特征显著，除芦芽山自然保护区外，其余地区植被覆盖度较低，土壤类型主要包括褐土、棕壤、栗钙土等，质地松散，极易受到侵蚀。同时，该区位于我国北方农牧交错带，第一产业主要粮食作物为玉米、马铃薯和大豆，第二产业以煤炭、铝土矿资源开采和冶炼为主，煤炭工业为地区经济支柱。受自然环境与社会经济的综合影响，晋西北水土流失、土壤污染、土地荒漠化等生态环境问题显著，基于晋西北国土空间的生态环境修复亟待讨论。

1.2 数据来源与处理

土地利用类型数据和归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/），土地利用类型数据按照中国土地利用数据的3级分类系统重分类，将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地共6类，数据时间为2000年、2005年、2010年、2015年、2020年，空间分辨率为30 m。数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)，分辨率为30 m；交通、水系、居民点数据源自全国地理信息资源目录服务系统（http://www.webmap.cn/）。基于ArcGIS软件平台，利用DEM计算坡度，利用交通、水系、居民点数据计算距道路距离、距水域距离、距居民点距离。主要粮食作物产量与主要农作物播种面积源自《山西省统计年鉴》，同期农产品价格来源于《全国农产品成本收益汇编》。为保证数据的统一性，以土地利用数据为基准进行数据坐标系和分辨率的统一。

1.3 研究方法

1.3.1 生态源地识别　生态源地是指生态环境质量较高且具有较高生态稳定性及扩展性的区域，本研究采用MSPA模型与生态系统服务价值相结合的方法筛选生态源地。MSPA模型将研究区分为核心区、连接桥、环岛、支线、边缘区、孔隙和孤岛7种类型，其中核心区表示大型斑块，是多种生态过程的“源”，对生物多样性保护及生态环境有重要作用。基于MSPA分析，参考已有文献与晋西北生态本底特征，设置林地与水域为前景，受到人类活动扰动较大的其他土地利用类型为背景，提取晋西北景观中的MSPA核心区。

生态系统服务价值由晋西北生态系统服务价值当量与粮食生产经济价值获取。生态系统服务价值当量以谢高地等[35]制定的中国“单位面积生态系统服务价值当量”为依据，基于晋西北土地利用类型，进行修正（表1）；粮食生产经济价值通过晋西北主要粮食作物玉米、马铃薯、大豆的年平均出售价格计算得到，计算公式如下：

$$E_t = \frac{1}{7}\sum_{i=1}^{n}\frac{m_{it}p_{it}q_{it}}{M_t} \qquad (1)$$

式中：E_t为单位面积农田生态系统在t年的粮食生产经济价值（元·hm^{-2}）；n为粮食作物种类总和；i为粮食作物种类；m_{it}为i种农作物在t年的种植面积（hm^2）；p_{it}为i种农作物在t年的全省平均价格（元·t^{-1}）；q_{it}为i种农作物在t年的单位面积产量（t·hm^{-2}）；M_t为

表1　晋西北生态系统服务价值当量

Tab. 1　Equivalent value of ecosystem services in Northwest Shanxi

生态系统服务		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
供给服务	食物生产	0.85	0.25	0.23	0.66	0.00	0.01
	原料生产	0.40	0.58	0.34	0.37	0.00	0.03
	水资源供给	0.02	0.30	0.19	5.44	0.00	0.02
调节服务	气体调节	0.67	1.91	1.21	1.34	0.00	0.11
	气候调节	0.36	5.71	3.19	2.95	0.00	0.10
	净化环境	0.10	1.67	1.05	4.58	0.00	0.31
	水文调节	0.27	3.74	2.34	63.24	0.00	0.21
支持服务	土壤保持	1.03	2.32	1.47	1.62	0.00	0.13
	维持养分循环	0.12	0.18	0.11	0.13	0.00	0.01
	生物多样性	0.13	2.12	1.34	5.21	0.00	0.12
文化服务	美学景观	0.06	0.93	0.59	3.31	0.00	0.05

所有农作物在t年的种植总面积(hm^2)。将生态系统服务价值用自然断点法分为五级,最高的两级为生态系统服务价值高值区。

将面积大于20 km^{2}的MSPA核心区与生态系统服务价值高值区叠加,确定为晋西北生态源地。

1.3.2 综合阻力面构建 选取高程、坡度、土地利用类型、NDVI、距道路距离、距居民点距离、距水域距离7个因子作为阻力因子,将各阻力因子划分为5个等级,值越大表示阻力系数越大,参考已有研究并结合研究区实际情况赋权构建综合生态阻力面(表2)。

1.3.3 生态廊道提取 生态廊道是连通不同生态源地的重要通道,也是生态系统物质循环、能量流动及信息传递的主要通道,电路理论通过源地间的电流强度反映生态廊道的相对重要性,从而预测物种扩散与迁移规律、识别移动路径[18]。为更好地模拟生物迁徙随机性、辨别生态源地间最小成本路径,基于生态源地和综合阻力面,引入电路理论原理,利用Linkage Mapper工具插件,提取生态廊道。

1.3.4 生态修复关键区域识别 生态修复关键区域识别包括生态夹点识别和生态障碍点识别,其中,生态夹点是物种在栖息地间运动通过可能性最高的区域,可替代性弱[36],生态障碍点是物种在源地间迁徙过程受到较大阻碍的区域,移除可显著提升源地间的连通性[37],夹点与障碍点在区域景观连通性和生态安全格局中起重要支撑作用。依据电路理论,通过计算累积电流强度识别生态夹点,将一个生态源地连接地面,其他生态源地依次输入相等的电流值,通过迭代运算得出累积电流值,电流强度高的区域即为生态夹点;通过计算累积电流恢复值的大小识别生态障碍点,运用移动窗口法搜索检测,值越大的障碍点对源地间连通性阻力越大。生态夹点和生态障碍点的识别通过ArcGIS软件及Circuitscape插件,分别利用Pinchpoint Mapper模块与Barrier Mapper模块实现。

2 结果与分析

2.1 生态源地识别

通过计算2000年、2005年、2010年、2015年和2020年晋西北地区的生态源地可知(图2,图3),2000—2005年生态源地数量均为18个,但面积从1898.43 km^{2}下降到1867.18 km^2;2005—2010年生态源地数量从18个增加到22个,生态源地面积也增长到2063.02 km^2;2010—2015年生态源地数量从22个变为21个,面积也从2063.02 km^{2}变为2026.76 km^2;2015—2020年生态源地数量从21个变为20个,面积从2026.76 km^{2}变为2026.17 km^2。其中,2005年相较2000年生态源地在数量不变的基础上面积明显缩小;2010年源地面积增长率达10.49%,在20 a内增速最快;2020年相较2015年源地面积占研究区总面积比例缩小幅度在0.1%内,保持了相对稳定。

从空间分布来看,晋西北生态源地呈现南部集中连片,北部零散分布的空间格局。2000—2020年生态源地集中分布在研究区南部岢岚县、兴县和五寨县的芦芽山自然保护区,三县生态源地面积占研究区生态源地总面积的73.41%~78.46%,在晋西北生态环境质量优越的地区中占主体地位。2000—2005年除芦芽山山区外,其余各县只有零散分布的生态源地;2005—2010年右玉县生态源地面积从86.82 km^{2}增长到221.72 km^2,源地分布数量明显增多;2010—2015年晋西北生态源地空间格局较为稳定,北部生态源地主要分布在洪涛山与管涔山的北侧;2015—2020年晋西北北部生态源地空间分布出现向南发展延伸的趋势。

表2 阻力因素赋值

Tab. 2 Assignment of resistance factor

阻力因子	1级	2级	3级	4级	5级	权重
高程/m	<1100	1100~1300	1300~1500	1500~1700	>1700	0.08
坡度/(°)	0~2	2~6	6~15	15~25	>25	0.07
土地利用类型	林地、水域	草地	耕地	未利用土地	建设用地	0.23
NDVI	>0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2	0.22
距道路距离/m	>4000	3000~4000	2000~3000	1000~2000	0~1000	0.12
距居民点距离/m	>2000	1500~2000	1000~1500	500~1000	<500	0.09
距水体距离/m	<1000	1000~2000	2000~3000	3000~4000	>4000	0.19

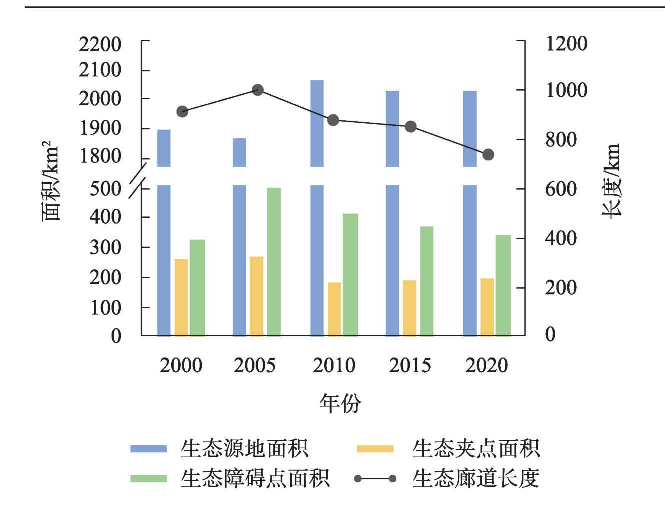


图2　2000—2020年晋西北源地、夹点、障碍点面积与廊道长度变化趋势

Fig. 2　Change trend of source, pinch, obstacle area and corridor length in Northwest Shanxi from 2000 to 2020

2.2　生态廊道构建

2000—2020年生态廊道数量与长度先增加后减少(图2,图4)。其中,2000年生态廊道42条,长度共计907.62 km;2005年廊道数量变化波动较小,共43条廊道,总长度增长至999.78 km;到2010年,晋西北生态廊道增长到51条,总长度却下降为877.16 km;2015年生态廊道共48条,总长度844.81 km;2020年廊道数量进一步下降至41条,长度也缩短到738.30 km。

晋西北地区南部生态廊道空间分布较为稳定,廊道分布密集且长度短,中部和北部廊道空间分布呈现由长且稀疏到短且密集的变化趋势。整体而言,短距离生态廊道大多位于研究区南部芦芽山山脉,连接了面积较大且分布集中的生态源地,长距离生态廊道将晋西北南部与北部的生态源地连接起来,还将北部零散分布的孤立源地相互连接起来,增强了晋西北地区的景观连通性。此外,长距离生态廊道能够连接两个距离较远的生态源地,是物种长途迁徙的关键通道,20 a间长度最长的生态廊道随生态源地的时空变化而由北向南偏移。2000年晋西北单一生态廊道长度最长为88.27 km,连接了北部阴山山脉与中部管涔山山脉的两处生态源地;2005—2015年依然以阴山与管涔山之间的生态廊道最长,但其长度有所下降;2020年廊道最长为60.26 km,位于晋西北中部,连接管涔山与芦芽山山脉。

2.3　生态修复关键区域识别

2.3.1　生态夹点识别　计算各生态源地间累计电流值,用自然断点法分为3类,定义为1~3级夹点区,

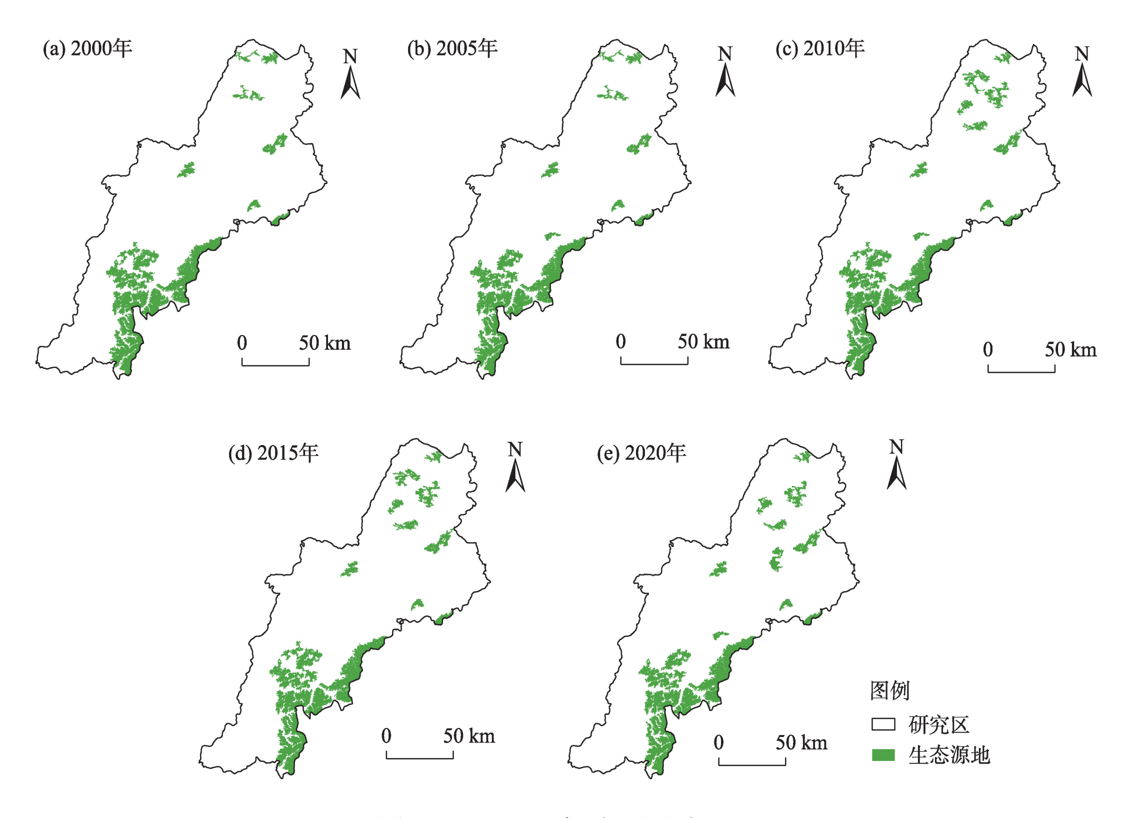


图3　2000—2020年晋西北生态源地

Fig. 3　Ecological source in Northwest Shanxi from 2000 to 2020

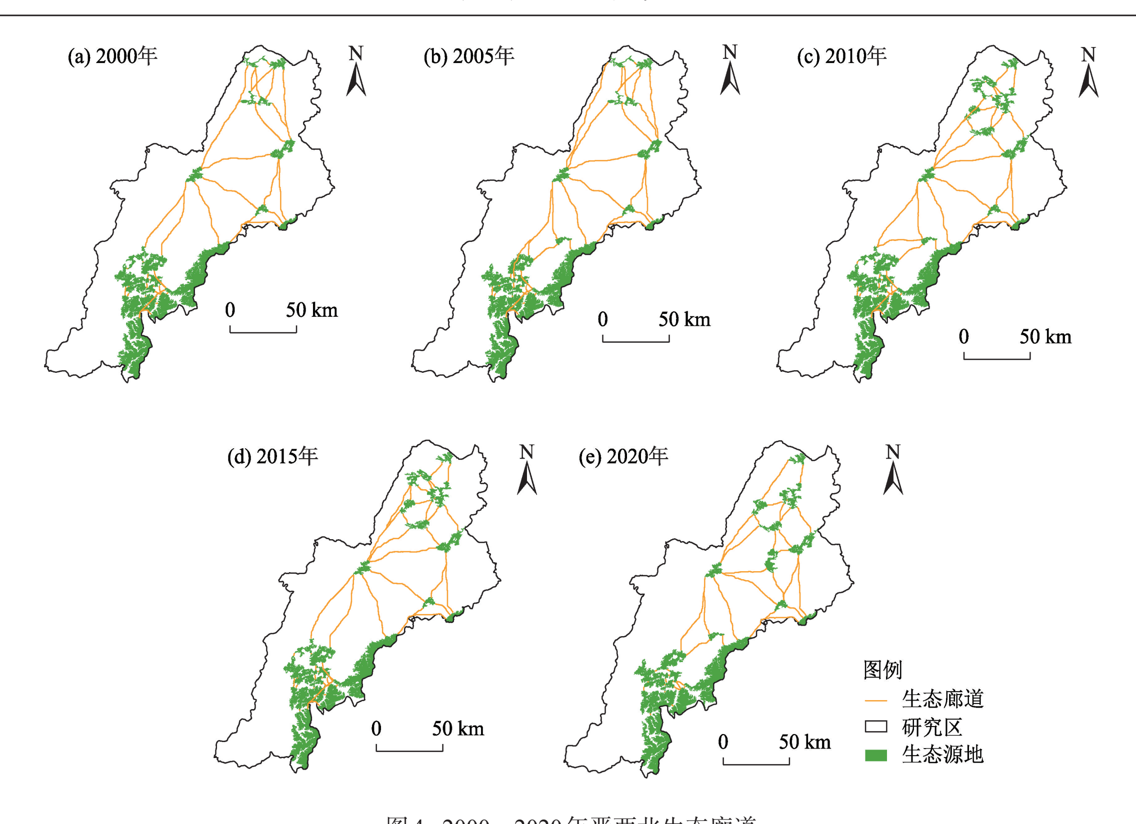


图4 2000—2020年晋西北生态廊道

Fig. 4 Ecological corridors in Northwest Shanxi from 2000 to 2020

将电流值最高的1级夹点区识别为生态夹点(图2,图5)。识别得到2000年、2005年、2010年、2015年、2020年生态夹点面积分别为262.89 km²、272.52 km²、182.13 km²、185.49 km²、194.34 km²,夹点面积先增加后减小再增加,总体呈缩小的趋势。在空间分布上,生态夹点普遍位于生态廊道的两端邻近生态源地的区域,这些区域处于生态源地辐射范围内,能为生物迁徙提供有力保障,在行政区划上主要分布在晋西北中部的偏关县、平鲁区、神池县和朔城区。总体来看,2000—2020年位于神池县和朔城区的生态夹点依凭芦芽山生态源地的稳定而保持了相对稳定,是管涔山东侧源地和芦芽山源地之间物种迁徙的必经之路;位于平鲁区和偏关县的生态夹点面积减小但数量增多,空间分布上由集中变为分散,出现了新的生态夹点,推动物种迁徙较高概率选择的路径由单一路径转变为多路径,且不同路径夹点面积之间的差距逐渐减小。此外,山阴县洪涛山南北两侧的生态夹点受人为活动干扰面积也逐年减小,需要通过生态修复维护生态夹点的稳定以确保物种正常迁徙,而右玉县物种迁移路径随生态源地和生态廊道增多而增加,在2010年后形成了新的小型生态夹点。

2.3.2 生态障碍点识别 计算各生态源地间电流恢复值,用自然断点法分为4类,定义为1~4级障碍区,取电流恢复值最高的1级障碍区为生态障碍点(图2,图6)。识别得到2000年、2005年、2010年、2015年和2020年生态障碍点面积分别为324.61 km²、504.72 km²、416.79 km²、368.07 km²、338.86 km²,障碍点面积呈现先大幅增加后逐渐减少的变化趋势。在空间分布上,生态障碍点普遍位于生态廊道的中段,受生境质量良好的源地生态辐射小,同时晋西北地区生态本底脆弱,人地关系不协调,生态环境问题显著,加大了物质交流与信息传递的难度。2000年生态障碍点主要分布在神池县、右玉县和平鲁区;2005年障碍点总面积同比2000年增长55.49%,晋西北各县障碍点面积都存在不同程度增长,尤以平鲁区和五寨县涨幅最高;2010年右玉县和五寨县障碍点面积明显减小;2015—2020年障碍点总面积逐步趋近2000年,但相较2000年障碍点在空间分布上呈现的聚集分布,2015—2020年障碍点逐渐趋于均匀分布,不同廊道间物种移动迁徙受到的阻力差异逐渐减小。将生态夹点和生态障碍

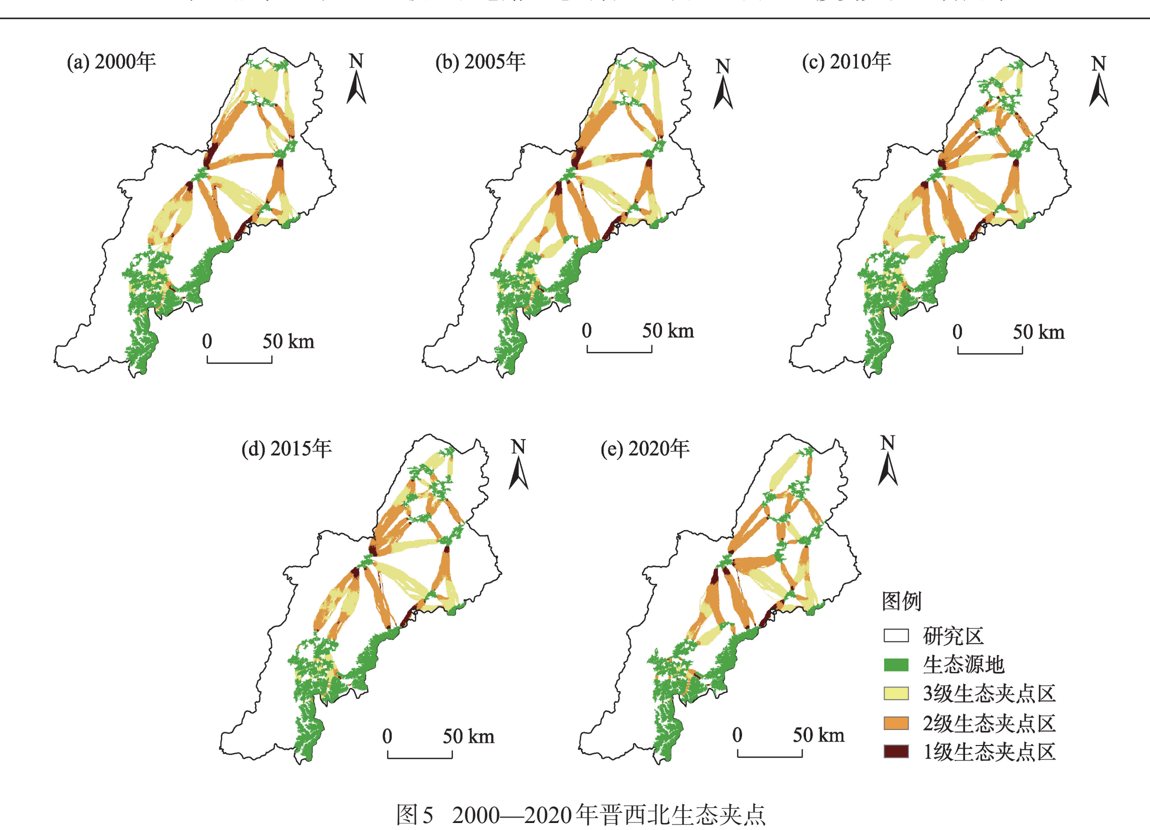


图5　2000—2020年晋西北生态夹点

Fig. 5　Ecological pinch-points in Northwest Shanxi from 2000 to 2020

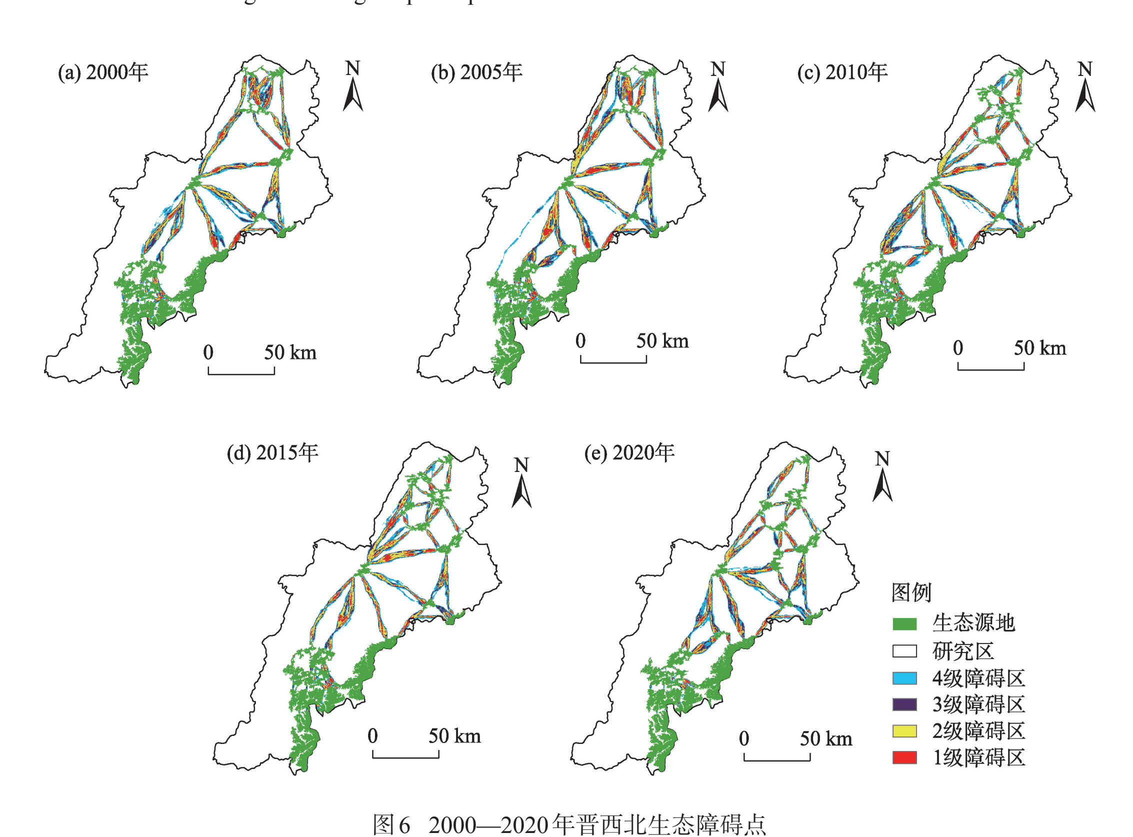


图6　2000—2020年晋西北生态障碍点

Fig. 6　Ecological barriers in Northwest Shanxi from 2000 to 2020

点叠加分析,存在夹点和障碍点重合的现象,表明在物种迁徙的必经路径中有阻碍较大的区域,针对该种区域应当优先进行生态修复,以确保物种迁徙路线的畅通。

3 讨 论

3.1 生态源地保护策略

总体来看，2000—2020年晋西北生态源地数量和面积均呈增加的趋势，源地质量总体向好。2000年以来，晋西北建设用地的快速扩张损害了源地生境质量，使得生态源地面积缩小，随着一系列生态修复工程的实施，生态源地面积逐渐增加，2010年是“三北”防护林工程第四期工程和退耕还林工程的收官之年，依托国家生态工程，2010年晋西北生态源地面积达到2063.02 km^2，生态成果显著。已有的研究结果显示2000—2019年晋西北沙漠化土地面积减少、范围缩小、程度减轻[34]，2000—2020年晋西北土地生态安全综合指数不断上升，整体的土地生态安全状况逐渐改善[38]，这与我们的研究结果相一致。

当前生态源地空间分布呈南部集中，北部零散的格局，由于芦芽山优越的自然本底与右玉县六十多年长期防风治沙、植树造林的生态措施，源地主要分布在芦芽山自然保护区与右玉县，应结合生态源地空间分布特征开展源地生态修复。晋西北全域继续深化落实生态工程，加强源地保护力度，逐步提高源地质量；晋西北南部在保持芦芽山自然保护区现有生态源地质量的基础上，扩展并兴建新的生态保护区；晋西北北部继续植树造林以扩大生态源地数量与面积，增强源地生态扩展性，同时控制建设用地开发，降低人为干扰。

3.2 生态廊道修复策略

2000—2020年晋西北生态廊道长度总体减少，物种迁徙距离缩短，源地间连通性增强。20 a间中部和北部廊道空间分布数量增多且距离缩短，但与晋西北南部芦芽山自然保护区集中连片生态源地形成的短且密集的生态廊道相比，其廊道长度仍然偏长且稀疏，这与晋西北中部和北部建设用地占比多，人类活动频繁有关，此外，因空间跨度大，长距离廊道的生态问题也更具多样性、复杂性。本研究分析了2000—2020年晋西北最长生态廊道的时空演变规律，发现其随生态源地的时空变化而由北向南偏移，且存在长度变短的状况，长距离的生态廊道对物种长途迁徙的稳定性起重要作用，应进一步加强廊道的规划建设。

生态廊道的修复措施以提高廊道景观连通性为核心。(1) 晋西北南部廊道连通性较好，以生态维护为主，着力提高保护意识，维护廊道数量和质量。(2) 晋西北中部与北部人类干扰强度大，应当采取人工干预的措施。控制建设用地的扩张，实施生态修复工程，如修建涵洞、隧道等设施连接被人类活动阻断的生态廊道；对生态空间已被占用，仅保护现有生态空间无法维持正常生态过程的生态廊道，应进行生态廊道的重建，恢复并提升廊道连通性。(3) 长距离生态廊道，其土地利用类型以草地和耕地为主，也有少部分土地利用类型为建设用地。廊道修复需要加强水土保持、预防土地荒漠化，增强沿途绿化工程，提升长距离廊道物质循环、能量流动、信息传输的能力。

3.3 生态修复关键区域修复对策

3.3.1 生态夹点修复对策　生态夹点是物种迁徙较高概率经过的区域，总体来看，2000—2020年晋西北生态夹点面积总体呈现减少的趋势。晋西北地区沟壑纵横的地貌、地表河流以及交通网络的阻断使生态夹点景观破碎性大，同时活跃的工业活动挤占了大量的生态空间，进一步导致了生态夹点的破碎。生态夹点的空间分布呈现由集中变为分散的趋势，平鲁区尤为明显。平鲁区是全国排名第五的产煤县区，生态夹点受工业活动范围扩大与产能增加的负面影响而面积减小，但同时，20 a间平鲁区与偏关县经资源整合、兼并重组，将众多高耗能高污染的中小型煤炭企业合并成了大型煤炭基地，实现节能减排，生态工程治理上实施京津风沙源二期水利水保项目、坡耕地综合治理项目，推进水土流失综合治理，实现区域生态环境质量总体提升，故出现了新的生态夹点，生态夹点空间分布上由集中变为分散。

依据生态夹点时空动态变化特征，因地制宜的小流域、小区域生态保护与修复是提升晋西北生态夹点质量的关键。晋西北北部平鲁区、左云、右玉等县生态夹点大多分布于小规模的林地，随着近年来一系列生态修复工程的实施，如洪涛山生态恢复项目、退耕还林工程等，该区生境质量明显提升。其中右玉县2020年林草面积占到全县土地总面积的62.57%，从不适合人类居住的地区变为联合国最佳宜居生态县。该区域应积极维护已有生态成果，保证生态修复措施与政策的连续性，继续推进落实生态修复工程，退耕还林还草工程，拓展林地面积以增加生态夹点数量与面积。晋西北中部和南部

岢岚、五寨、神池、偏关等县生态夹点大部分位于草地,该区依托芦芽山自然保护区丰富的森林资源,采取封山育林、禁止砍伐、打击盗猎等多项综合措施,维护生态夹点数量与面积。对与生态障碍点重合的生态夹点区域,应遵循自然修复与工程治理相结合的原则,保障生态夹点连通性:针对草地类型生态夹点,依靠围栏封育、补播种草等措施修复退化草场;针对林地类型生态夹点,依靠封山育林、植被培护,扩大林草面积,提升植被覆盖度,改善林地生物群落结构,提升生态夹点质量与面积。

3.3.2 *生态障碍点修复对策* 生态障碍点是物种在迁徙过程中受到较大阻碍的区域,2000—2020年晋西北生态障碍点总面积扩大,但在空间分布上障碍点逐渐趋于均匀分布。神池及右玉县多山地丘陵,地表沟壑纵横,景观破碎性大,水土流失等生态问题严重,平鲁区煤炭工业发达,人为扰动影响较大,都对生态廊道的连通性起到严重的阻碍作用,2000年生态障碍点主要分布在神池县、右玉县和平鲁区;2005年障碍点总面积大幅增长,这是由于这一时期工业活动的繁荣使建设用地增多、林草面积缩小,物种在源地间迁徙过程中受到的阻力增大,景观的连通性遭到破坏。2010年,"三北"防护林工程、退耕还林工程等生态修复工程的实施,使右玉县和五寨县障碍点面积明显减小;2015—2020年障碍点总面积逐步减小,面积接近2000年的水平,空间分布上逐渐趋于均匀分布,这得益于国家与省级各项生态工程的实施,使晋西北全域生境质量明显提升,不同廊道间物种迁徙受到的阻力减小。

生态障碍点一般距离生态源地较远,生态基底相对薄弱,并对生态廊道的连通性造成阻碍,应实施系统性生态修复工程。平鲁区为晋西北障碍点生态修复的攻坚区域,以平鲁区为代表的煤炭主产区应以修复已遭受破坏的生态环境为主要任务,加强废弃矿山修复,推进采煤沉陷区复垦综合治理,抓好工矿企业污染防治,健全生态环境保护法律条例,构建可持续发展的战略决策。朔城区、五寨县等人口稠密、城市建设用地飞速增长的区域应进行建设用地结构优化,严格划定并遵守"三区三线"的边界管控,建设人地友好、生态和谐的城市。神池县、右玉县等受地形水文条件影响造成生态廊道阻碍的区域,应通过人为建设生态斑块的方法,从根源上提升障碍点生境质量与生态源地面积,降低生态廊道阻力。

4 结 论

目前,我国国土空间生态修复相关理论研究滞后于实践,且关于黄土高原的生态修复关键区域识别研究少有报道。本文以黄土高原典型区域晋西北地区为研究区,基于MSPA和生态系统服务价值识别生态源地,构建综合阻力面,基于电路理论提取生态廊道,识别生态夹点、障碍点为国土空间生态修复的关键区域,分析源地、廊道、生态关键区域时空演变规律,并在此基础上依据生态本底特征提出生态修复对策。得出如下结论:

(1) 2000—2020年晋西北生态源地数量与面积呈现出先增加后趋于稳定的变化态势;空间分布呈现南部集中连片,北部零散分布的格局,且北部生态源地增多的同时空间分布出现向南发展的趋势。源地面积和数量的变化导致生态廊道数量与长度先增加后减少,表现为南部生态廊道密集且长度短,空间分布较为稳定;中部和北部廊道空间分布呈现由长且稀疏到短且密集的变化趋势;长度最长的单一廊道由北向南偏移。

(2) 2000—2020年晋西北夹点面积先增加后减小再增加,总体呈缩小的趋势,夹点普遍位于生态廊道的两端邻近生态源地的区域,主要分布在偏关县、平鲁区、神池县和朔城区,土地利用类型以草地、林地为主。生态障碍点面积呈现先大幅增加后逐渐减少的变化趋势,普遍位于生态廊道的中段,由聚集分布转变为均匀分布,土地利用类型以建设用地为主。存在夹点和障碍点重合的现象。

(3) 晋西北关键区域生态修复包括生态夹点修复和生态障碍点修复。因地制宜的小流域、小区域生态保护与修复是提升晋西北生态夹点质量的关键,应以自然修复为主,人工保护为辅;对与生态障碍点重合的生态夹点区域,应遵循自然修复与工程治理相结合的原则优先修复;对生态障碍点应实施系统性生态修复工程,通过人工干预建设生态斑块的方法,从根源上提升障碍点生境质量,修复改善已遭受破坏的生态环境。

参考文献(References):

[1] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认

知[J]. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1-10. [Cao Yu, Wang Jiayi, Li Guoyu. Ecological restoration for territorial space: Basic concepts and foundations[J]. China Land Science, 2019, 33(7): 1-10.]
[2] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 64-69. [Fu Bojie. Several key points in territorial ecological restoration[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(1): 64-69.]
[3] 白中科. 国土空间生态修复若干重大问题研究[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 1-13. [Bai Zhongke. The major issues in ecological restoration of China's territorial space[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 1-13.]
[4] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419. [Peng Jian, Zhao Huijuan, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]
[5] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136. [Pan Jinghu, Liu Xiao. Assessment of landscape ecological security and optimization of landscape pattern based onspatial principal component analysis and resistance model in arid inland area: A case study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3126-3136.]
[6] 包玉斌, 王耀宗, 路锋, 等. 六盘山区国土空间生态安全格局构建与分区优化[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1172-1183. [Bao Yubin, Wang Yaozong, Lu Feng, et al. Construction of an ecological security pattern and zoning optimization for territorial space in the Liupan Mountain Area[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1172-1183.]
[7] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 等. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1461-1473. [Li Quanquan, Jin Xiaobin, Zhang Xiaolin, et al. Comparison and evaluation of the ecological network construction method based on principles of landscape ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (4): 1461-1473.]
[8] 马晓琳, 郭莎莎, 徐扬, 等. 生态脆弱区生态安全格局构建研究[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9500-9513. [Ma Xiaolin, Guo Shasha, Xu Yang, et al. Research on ecological security pattern construction in vulnerable ecological region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9500-9513.]
[9] 郑群明, 扈嘉辉, 申明智. 基于MSPA和MCR模型的湖南省生态网络构建[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2021, 44(5): 1-10. [Zheng Qunming, Hu Jiahui, Shen Mingzhi. Construction of ecological network in Hunan Province based on MSPA and MCR Models[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2021, 44(5): 1-10.]
[10] Liu H L, Wang Z L, Zhang L P, et al. Construction of an ecological security network in the Fenhe River Basin and its temporal and spatial evolution characteristics[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137961.
[11] 覃彬桂, 林伊琳, 赵俊三, 等. 基于InVEST模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J]. 中国环境科学, 2023, 43(2): 809-820. [Qin Bingui, Lin Yilin, Zhao Junsan, et al. Identification of key areas for the ecological restoration of territorial space in Kunming based on the InVEST model and circuit theory[J]. China Environmental Science, 2023, 43(2): 809-820.]
[12] 李倩瑜, 唐立娜, 邱全毅, 等. 基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建——以厦门市为例[J]. 生态学报, 2024, 44(6): 2284-2294. [Li Qianyu, Tang Lina, Qiu Quanyi, et al. Construction of urban ecological security pattern based on MSPA and MCR Model: A case study of Xiamen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2284-2294.]
[13] Vogt P, Riitters K H, Iwanowski M, et al. Mapping landscape corridors[J]. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 481-488.
[14] 朱琪, 袁泉, 于大炮, 等. 基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3463-3473. [Zhu Qi, Yuan Quan, Yu Dapao, et al. Construction of ecological security network of Northeast China forest belt based on the circuit theory [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3463-3473.]
[15] 曹秀凤, 刘兆顺, 李淑杰, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以吉林省松原市为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2779-2787. [Cao Xiufeng, Liu Zhaoshun, Li Shujie, et al. Identification of key areas of ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security: A case of Songyuan City, Jilin Province[J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2779-2787.]
[16] Yang Y, Chen J J, Huang R J, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecological protection: A case study of Guangxi, a Karst Region in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19 (9): 5699-5699.
[17] 刘春飞, 刘平辉, 朱传民. 基于电路理论的生态安全格局构建的生态以赣州市为例[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(23): 30-37. [Liu Chunfei, Liu Pinghui, Zhu Chuanmin. Construction of ecological security pattern based on circuit theory: A case study of Ganzhou City[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(23): 30-37.]
[18] Fisher G, Velthuizen H V, Shah M, et al. Global agroecological assessment for agriculture in the 21st Century: Methodology and results[J]. Journal of Hunan Vocation-technical Teachers College, 2002, 11(8): 371-374.
[19] 张玥, 许端阳, 李霞, 等. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1933-1943. [Zhang Yue, Xu Duanyang, Li Xia, et al. Construction of ecological corridors and identification of key nodes in the core area of China-Laos transportation corridors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1933-1943.]
[20] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710. [Peng Jian, Li Huilei, Liu Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 701-710.]

[21] 程纪元. 基于生态网络的长治市矿区生态修复策略研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2021. [Cheng Jiyuan. Research on Ecological Restoration Strategies of Mining Areas in Changzhi Area Based on Ecological Network[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.]

[22] 刘凤莲, 刘艳. 基于生态安全格局的高原城市生态修复关键区域识别——以昆明市为例[J]. 国土资源科技管理, 2023, 40(3): 17-30. [Liu Fenglian, Liu Yan. Identification of key areas for ecological restoration in plateau cities based on the ecological security pattern: A case study of Kunming[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2023, 40(3): 17-30.]

[23] 向爱盟, 岳启发, 赵筱青, 等. 西南喀斯特山区国土空间生态修复关键区识别及修复分区——以开远市为例[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6571-6582. [Xiang Aimeng, Yue Qifa, Zhao Xiaoqing, et al. Identification and restoration zoning of key areas for ecological restoration of territorial space in southwestern karst mountainous areas: A case study of Kaiyuan City, China[J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6571-6582.]

[24] 薛强, 路路, 牛韧, 等. 基于地质灾害敏感性的生态安全格局关键区识别与修复——以济南市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 9050-9063. [Xue Qiang, Lu Lu, Niu Ren, et al. Identification and restoration of key areas of ecological security pattern based on sensitivity to geological disasters: A case study of Jinan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9050-9063.]

[25] 古雄. 基于生态网络构建的县域国土空间生态保护与修复策略研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2022. [Gu Xiong. Research on Ecological Protection and Restoration Strategy of County Territorial Space Based on Ecological Network Construction: A Case Study of Taihe County, Jiangxi Province[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2022.]

[26] 温雪静, 周智, 张美丽, 等. 太行山区国土空间生态修复关键区域识别——以唐县为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(12): 2093-2106. [Wen Xuejing, Zhou Zhi, Zhang Meili, et al. Identification of key areas of territorial ecological restoration in Taihang Mountains: A case study of Tang County[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(12): 2093-2106.]

[27] 张美丽, 李智, 张益琛, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以河北省阜平县为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 299-307, 3. [Zhang Meili, Li Zhi, Zhang Yichen, et al. Identification of key areas of ecological restoration of land and space based on ecological security pattern: Take Fuping County in Hebei Province as example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 299-307, 3.]

[28] 付扬军, 师学义. 基于小流域尺度的县域国土空间生态修复分区——以山西汾河上游为例[J]. 自然资源学报, 2023, 38(5): 1225-1239. [Fu Yangjun, Shi Xueyi. Ecological restoration zoning of county-level territorial space based on small watershed scale: A case study of the upper Fenhe River in Shanxi[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(5): 1225-1239.]

[29] 孙茂森, 王让会, 宁虎森. 阿克苏河流域生态网络构建[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1509-1516. [Sun Maosen, Wang Ranghui, Ning Husen. Construction of the ecological network in the Aksu River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(9): 1509-1516.]

[30] 郑群明, 申明智, 钟林生. 普达措国家公园生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 874-885. [Zheng Qunming, Shen Mingzhi, Zhong Linsheng. Construction of ecological security pattern in Pudacuo National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3) : 874-885.]

[31] 祁强强, 徐占军. 生态安全格局时空演变分析——以太原城市群为例[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5987-5997. [Qi Qiangqiang, Xu Zhanjun. Analysis on the spatio-temporal evolution of ecological security patterns: A case study over Taiyuan Urban Agglomeration[J]. China Environmental Science, 2023, 43(11): 5987-5997.]

[32] 张海铃, 叶长盛, 胡梦姗. 基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复关键区域识别及修复策略[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 393-402. [Zhang Hailing, Ye Changsheng, Hu Mengshan. Identification and restoration strategy of key areas of ecological restoration in urban agglomeration around Poyang Lake based on ecological security pattern[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 393-402.]

[33] 朱东红. 晋西北地区生态环境质量评价研究[D]. 太原: 山西大学, 2003. [Zhu Donghong. The Study of Assessment on the Eco-environment Quality of the Northwestern Region in Shanxi Province [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2003.]

[34] 薛占金, 秦作栋, 程芳琴. 晋西北地区土地沙漠化时空格局及其驱动因素[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5428-5435. [Xue Zhanjin, Qin Zuodong, Cheng Fangqin. Spatial-temporal patterns and driving factors of aeolian desertification in Northwest Shanxi Province[J]. China Environmental Science, 2020, 40(12): 5428-5435.]

[35] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30 (8): 1243-1254.]

[36] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352. [Song Lili, Qin Mingzhou. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3344-3352.]

[37] Brad H McRae, Sonia A Hall, Paul Beier, et al. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits[J]. PLoS ONE, 2012, 7(12): e52604.

[38] 杨园园. 晋西北生态脆弱区土地生态安全评价及影响因素研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2023. [Yang Yuanyuan. Evaluation and Influencling Factors of Land Ecological Security in Ecologically Fragile Area of Northwest Shanxi[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2023.]

Identification of the key regions of spatial ecological restoration in the Northwest Shanxi based on the MSPA model and circuit theory

LI Kexuan[1], ZHANG Lei[2], LI Hao[2], ZHANG Enyue[1], LI Yuzhen[1],
SONG Caiyun[1], LIU Geng[1]

(1. College of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2. School of Economics and Management, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Ecological restoration of land space is an important measure to implement the national strategy of ecological civilization. The identification of key areas of ecological restoration is a key link to the ecological restoration of land space and is difficult to carry out scientifically. Maintaining regional ecological security is of great significance. However, at present, the research on the key region identification of ecological restoration in our country lags in practice. In this paper, based on the morphological spatial analysis (MSPA) model and the value of ecosystem services, the ecological corridor was identified and extracted by circuit theory, the key areas of ecological restoration were identified, the space-time evolution law was analyzed, and the corresponding ecological restoration strategies were provided. The results showed that from 2000 to 2020, the quantity and area of ecological source areas in Northwest Shanxi increased, and the total source areas enhanced from 1898.43 to 2026.17 km^2 in 20 years. The number and length of eco-corridors first elevated and then decreased, and their spatial distribution was short and dense in the south, middle, and north. In the key areas of ecological restoration, the area of ecological pinch declined from 262.89 to 194.34 km^2 in the past 20 years; the ecological barrier sites in Pianguan County, Pinglu District, Shenchi County, and Shuocheng District enhanced from 324.61 to 504.72 km^2 and then reduced to 338.86 km^2; the obstacle points were generally distributed in the middle of the ecological corridor, and their distribution changed from aggregation to uniformity. The paper studies the space-time evolution characteristics of the critical ecological restoration areas and the ecological background of the study areas. It also puts forward the targeted ecological restoration strategies, namely, strengthening the management of small watersheds and areas at pinch and obstacle points, and reducing human disturbance, to provide reference for regional land space ecological restoration.

Keywords: ecological restoration for territorial space; identification of key areas; spatio-temporal evolution; Northwest Shanxi